

考虑横向抗剪效应的节理岩体全长黏结型锚杆 锚固机制研究及进展

刘才华^{1,2}, 李育宗^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 全长黏结型锚杆在岩质边坡和洞室支护等领域有着广泛的工程研究背景, 由于岩体的结构效应, 全长黏结型锚杆除发挥轴向抗拉作用外, 同时因不稳定岩体具有沿结构面发生滑动或滑动趋势而发挥横向抗剪效应。拉剪作用下, 节理岩体锚杆与纯受拉荷载作用的锚杆在地质特征、力学机制、失效模式以及评价方法上存在本质的差别。近些年来, 国内外相关学者针对节理岩体锚杆的力学与变形特征、岩石/浆体与锚杆的相互作用和锚杆破坏机制及模式等方面开展大量的试验研究与理论分析, 以揭示与其地质力学特征相适应的锚固机制、建立相应的锚固理论体系和工程设计方法。本文从结构控制稳定的角度出发, 系统地分析节理岩体锚固机制研究的工程背景和科学意义, 探讨拉剪作用下节理锚杆的力学与变形演化规律, 揭示基于岩石/浆体与锚杆相互作用的节理岩体内在锚固机制, 对比分析节理岩体锚固弹性地基梁模型和结构力学模型的优缺点。在总结分析节理岩体锚固研究成果的基础上, 指出当前研究重点及存在的问题, 提出节理岩体锚固理论与评价方法的研究方向, 有望对完善节理岩体锚固理论体系及建立工程设计方法提供参考。

关键词: 岩石力学; 节理岩体; 全长黏结型锚杆; 锚固机制; 破坏模式; 锚固模型

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)08 - 1856 - 17

Research progress in bolting mechanism and theories of fully grouted bolts in jointed rock masses

LIU Caihua^{1,2}, LI Yuzong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Fully grouted bolts are widely applied in rock slope and tunnel engineering. Due to the structural effect of rock masses, the sliding of the unstable block along the joint plane causes the combined action of axial and shear forces in the bolt. The bolting theory of jointed rock mass is essentially different from the pull rod model which takes the bolt as a pure tension element in many respects such as geological features, mechanical mechanism, failure mode and evaluating method. In the past decades, in order to reveal the bolting mechanism of fully grouted bolts in jointed rock mass and then to develop the bolting theory and design method, laboratory tests and theoretical analysis were performed with respect to the stress and deformation performance of jointed rock bolts, interaction between rock/grout and bolts, failure mechanism of bolts and theoretical approaches. From the

收稿日期: 2018 - 04 - 26; **修回日期:** 2018 - 05 - 31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51379204); 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放研究基金项目(2015KDZ06)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51379204) and Open Funds Research Project of Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area(China Three Gorges University), Ministry of Education(Grant No. 2015KDZ06)

作者简介: 刘才华(1974 -), 男, 博士, 1997年毕业于重庆建筑大学工民建专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事岩体灾变理论与控稳技术方面的研究工作。E-mail: cchliu@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0412

viewpoint of rock structure controlling the stability, the engineering background and scientific interest of jointed rock bolting were presented, and the mechanical behavior and deformation response of jointed rock bolts due to the combined action of tension and shear were investigated in this paper. The bolting mechanism of fully grouted bolts in jointed rock masses was explored and comparisons between the elastic ground beam model and the structural mechanic model were carried out. Finally, on the basis of a detailed summary of existing researches, key problems and development tendency of bolting theory of jointed rock mass were pointed out. The work presented is to attempted to provide a reference for the understanding of bolting mechanism of jointed rock mass, the development of bolting theories and the practice of bolting engineering.

Key words: rock mechanics; jointed rock mass; fully grouted bolts; bolting mechanisms; failure modes; bolting models

1 引言

岩体的稳定性一直是岩石力学与工程领域的一个基础性研究课题。近些年来, 伴随着我国经济快速发展, 一些关系到国计民生的大型建设项目如中西部大型水电工程、高速公路和高速铁路、深部资源开采、战略石油储备以及核电工程等相继实施, 工程区岩体的稳定性及灾变问题相当突出。全长黏结型锚杆以其独特的加固效益、便捷的施工工艺和相对低廉的经济造价在岩石工程领域得到大力发展和广泛使用。但是, 应该指出的是, 锚固理论的研究一直落后于工程实践, 工程实践仍采用工程类比法或半理论半经验方法^[1], 现有的计算分析模型存在理论与实际情况出入较大, 甚至出现设计理论在很大程度上不能反映锚固内在力学机制的问题, 这种现象在节理岩体锚固中尤为明显。

在我国相关的锚固设计规范^[2-4]中, 全长黏结型锚杆一直被看作为纯受拉杆件, 这种只考虑锚杆轴力作用而不考虑锚杆横向抗剪效应的“拉杆模型”对于土体或破碎岩体介质无疑是适用的, 但对于节理岩体来说, 岩体中的结构面对岩体的力学特性、变形特征和失稳破坏模式起着关键的控制作用^[5-7], 不稳定岩体沿结构面发生滑动或具有滑动趋势, 岩体对锚杆体有强烈的横向约束作用, 全长黏结型锚杆具有较大的抗剪刚度, 其对不稳定岩体沿结构面的滑动变形或趋势起到约束作用。因此, 在评价节理岩体锚固强度贡献时, 不仅要考虑锚杆轴力的作用, 而且要考虑锚杆的横向抗剪效应, 即需综合考虑锚杆轴力和横向抗力对节理岩体锚固抗力的贡献。实际上, 工程实践和室内试验研究表明, 加锚节理的破坏无不是由锚杆轴力和横向剪力的联合作用所导致^[8-12](见图 1)。遗憾的是, 由于当前节理岩



(a) 现场照片^[8]



(b) 试验照片^[12]

图 1 加锚节理岩体拉剪破坏现象

Fig.1 Failure of bolted jointed rock mass

体锚固机制研究非常不充分, 还没有建立起基于锚杆横向抗剪效应的节理岩体锚固理论体系及其失效判据, 导致在边坡、洞室等节理岩体锚固工程中, 锚杆的横向抗剪效应被忽略, 锚杆的失效破坏被简单地认为仅受其轴力控制, 这显然是不合理的^[13-17]。

自从 1974 年 S. Bjurström^[18]开展加锚花岗岩节理剪切强度研究以来, 拉剪作用下全长黏结型锚杆的力学特性已经引起了广泛的重视, 特别是在试验研究方面取得了积极的进展。基于拉剪作用的节理岩体

锚固试验分为两大类：一是基于岩石或混凝土试件的大尺寸剪切试验^[19-35]；二是相似模拟试验^[36-43]。由于所研究对象的复杂性以及模型边界条件和主控参量的差异性，相似模拟试验结果往往产生较大的偏差，而采用工程锚杆的大尺寸剪切试验易于实施，且能更真实地研究全长黏结型锚杆的锚固机制。因此，相对于相似模拟试验，加锚节理岩体大尺寸剪切试验成为当前考虑横向抗剪效应的锚固试验研究的主要手段。加锚节理岩体剪切试验研究主要包括2个方面：

(1) 节理岩体锚杆变形特征分析，同时探讨不同几何力学边界条件下锚杆横向剪切效应及其敏感性分析，包括锚杆和岩石的几何力学参数、锚固参数、锚固类型以及结构面力学参数等^[10, 28-30]；

(2) 考虑横向抗剪效应的加锚节理面剪切强度研究，基于剪切试验数据提出节理岩体锚杆的抗力经验表达式^[18, 43-45]。

由于节理岩体锚固机制复杂、影响因素众多，相对于室内试验，节理岩体锚固理论研究进展相当缓慢，核心问题在于尚未建立一个反映考虑锚杆横向抗剪效应的加锚节理岩体内在力学特性的地质力学模型。弹性地基梁模型最早应用于节理岩体锚固研究^[30, 44-49]，试图解决岩石对锚杆的横向约束力与锚杆挠曲变形的关系，但是，在较小的剪切荷载/位移条件下，锚杆横向剪切变形段砂浆挤压破碎并出现与锚杆解耦的现象，因此，该模型没有真实反映横向剪切变形段锚杆与岩石的力学状态。笔者基于锚杆横向剪切变形段的反对称变形特点，提出了节理岩体锚杆的结构力学模型^[50]，该模型将锚杆横向剪切变形段视作两端固定的超静定梁，采用结构力学理论中的力法方程进行锚杆内力求解。近几年来，加锚节理岩体结构力学模型得到了进一步的发展^[12, 51]。结构力学模型将岩石对锚杆的法向约束作用进行了简化处理，可以采用成熟的结构力学理论进行解析分析，但没有解决锚杆进入塑性状态后锚杆内力及其对结构面强度贡献的计算问题。拉剪作用下节理岩体锚固理论研究中的另一个难点在于锚杆失效模式的判别，目前比较认可的失效模式为锚杆与节理面交点处的拉剪破坏以及反对称分布于节理面两侧的塑性较拉弯破坏^[12, 28-33]。但是，对于2种破坏模式的界定问题尚无明确的量化指标，一般认为当岩石较为坚硬时发生拉剪破坏，而较为软弱的岩石则发生拉弯破坏。

上述研究在一定程度上揭示了节理岩体锚固的

内在机制，同时在锚固理论上有了些认知和突破，但总体而言，考虑锚杆横向抗剪效应的节理岩体锚固机制及理论方面的研究任重道远。因此，从完善锚固理论和解决锚固工程实践问题的角度考虑，需要重点关注拉剪作用下节理岩体锚固的内在力学机制，研究符合其地质力学特征的锚固地质力学模型，建立相应的节理岩体锚固理论体系，进而探讨拉剪作用下节理岩体锚固抗力评价方法，为建立节理岩体锚固工程设计与评价方法提供理论支持。

本文在对拉剪作用下节理岩体锚固研究现状和研究成果进行总结的基础上，系统分析考虑锚杆横向抗剪效应的节理岩体锚固的地质力学特征、研究方法以及锚固机制，详细解析当前节理岩体锚固研究存在的不足和亟需解决的理论与工程问题。

2 节理岩体锚固地质力学特征

2.1 节理岩体锚杆的销钉效应

锚杆对节理岩体的加固作用主要是通过提高节理面的抗剪能力、约束变形以提高岩体的稳定性。其锚固作用表现在以下3个方面(见图2)：

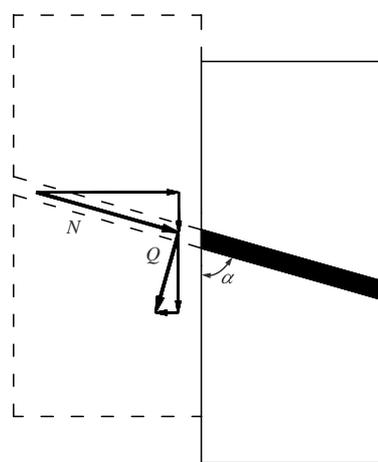


图2 加锚节理面锚杆抗力

Fig.2 Resisting forces of a jointed rock bolt

(1) 岩体沿节理面或潜在滑动面出现变形或变形趋势，锚杆轴力(N)沿节理面的法向分力增加了节理面的抗剪力；

(2) 锚杆轴力沿节理面方向的分力直接提供抗滑力；

(3) 节理面的相对位移使锚杆承受横向剪切荷载，由于锚杆具有一定刚度，杆体本身的横向抗剪能力(Q)将限制节理面的相对变形，即“销钉”效应^[11]。

通常，锚杆发挥其横向抗剪能力要具备以下 3

个条件：

(1) 锚固范围内的岩体节理面或潜在滑动面产生剪切变形或相对错动；

(2) 锚杆与围岩紧密接触，以使锚杆与岩体之间具备良好的荷载传导性；

(3) 锚杆要具有一定的抗剪切强度及刚度，以使锚杆对岩体的横向变形产生较强的灵敏性和控制作用。

显然，对于以高强钢筋作为杆体材料的全长黏结型锚杆，只要节理面发生相对剪切变形或具有剪切变形趋势，锚杆就会产生横向抗剪作用。对节理岩体来说，锚杆的销钉效应同其轴向抗力对锚固效果同等重要。

拉剪作用下，锚杆除了出现轴向拉伸变形外，节理面附近一定范围内锚杆出现弯曲变形。研究表明，锚杆受横向剪切作用下，在岩体节理面附近 2~4 倍的锚杆直径的范围内发生明显的弯曲变形^[11, 52-53]，即节理面附近锚杆横向剪切变形段长度 $l = nD_b$ ($n = 2 \sim 4$, D_b 为锚杆直径)。此时，横向剪切变形段锚杆后面浆体及岩石发生挤压变形，而前面浆体与锚杆出现解耦脱离现象，在锚杆与节理面交点两边，挤压变形区和解耦脱离区呈反对称分布，如图 3 所示。

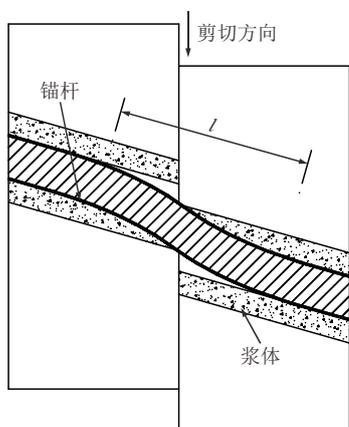


图 3 拉剪作用下锚杆横向剪切变形

Fig.3 Transverse deformation of a jointed rock bolt

2.2 锚杆横向剪切变形段荷载分布

锚杆横向剪切变形段除了受锚杆横截面上的轴力、剪力和弯矩作用外，还受两类分布荷载作用：一是因锚杆轴向拉伸变形在锚杆和浆体界面产生的剪应力(砂浆握裹力) τ ，二是因锚杆横向剪切变形，砂浆或基岩对锚杆的法向约束力 q 。图 4 为在节理面一侧横向剪切变形段的荷载示意图。

图 4 中 A 点为横向剪切变形段的端点，该点无挠曲变形，O 点为锚杆与节理面的交点，是锚杆横

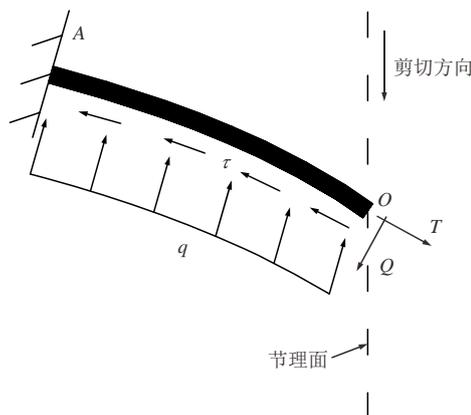


图 4 横向剪切变形段的荷载

Fig.4 Loads applied at the deflecting section of a bolt

向剪切变形段的反弯点，弯矩为 0。锚杆拉拔试验结果^[54]表明，在轴力作用下，锚固段近端锚杆与砂浆发生解耦，剪切抗力 τ 沿锚固段的变化呈现单峰特征，即由 O 点 τ 为 0 逐渐增大，达到峰值后逐渐减小为 0。对于承受拉剪作用的节理岩石锚杆，相对于数十厘米至数米的锚固段，只有 2~4 倍锚杆直径的横向剪切变形段长度相对较小，横向剪切变形段的砂浆握裹力相对于锚杆轴力可以忽略不计。

砂浆约束锚杆横向剪切变形的法向应力 q 分布非常复杂，受浆体或岩石强度、锚杆状态(弹性或塑性)以及节理面剪切变形大小等因素的影响。

A. M. Ferrero^[30]将处于弹性状态时的锚杆视为弹性地基梁，认为岩石对锚杆的横向约束应力正比于锚杆垂直于其轴线的挠曲变形，即

$$q = \delta D_b \Delta \tag{1}$$

式中： δ 为表征地基系数的岩石模量， Δ 为锚杆垂直于其轴向的变位。

M. Holmberg^[55]建议用下式来描述弹性状态下岩石模量与岩石的单轴抗压强度的关系：

$$\delta = \frac{300\sigma_c}{D_b} \tag{2}$$

式中： σ_c 为岩石单轴抗压强度。

塑性状态下，假定锚杆所受的横向约束作用类似于条形基础的基底应力，此时，岩石的约束应力达到极值，可采用下式计算：

$$q_u = m\sigma_c \tag{3}$$

式中： m 为取决于岩石内摩擦角的参数，一般取值为 2~5。

式(3)意味着当锚杆处于塑性状态时，岩石对锚杆的法向约束应力只与岩石的单轴抗压强度有关，且沿横向剪切变形段呈矩形分布。

上述基于弹性地基梁或条形基础的应力计算方

法存在着分析和应用上的困难，前者需要确定锚杆挠曲线方程，后者作为经验方法有待验证且在系数取值上存在不确定性。因此，在相关的理论分析中，岩石对锚杆的法向约束应力常常进行了简化处理，多采用矩形、三角形或梯形分布形式^[12, 30, 50-51]。

2.3 失效模式与屈服条件

目前，对节理岩体全长黏结型锚杆的失效模式尚无统一的认知，现有的研究表明，基于不同的基岩强度，节理锚杆呈现2种破坏模式：对于较为坚硬的岩体，节理面处锚杆受其轴力和剪力联合作用呈现拉剪破坏，A. M. Ferrero^[30]认为发生拉剪破坏时岩石的单轴抗压强度不小于50 MPa；而对较弱的岩体，锚杆发生拉弯破坏，即在拉剪荷载作用下，位于结构面两侧2~4倍锚杆直径处出现塑性铰，随着剪切荷载的进一步增加，锚杆达到极限抗拉强度或极限应变而失效。此外，当岩石非常软弱时，其对锚杆的横向约束很小，锚杆的横向抗剪效应难以发挥作用，此时，锚杆的横向抗力相对其轴向抗力可以忽略不计，锚杆破坏呈现拉拔破坏的特征。由于此类破坏类型不考虑锚杆的横向抗剪效应，在相关节理岩体锚固研究中不做探讨。

剪切荷载作用下，锚杆横向剪切变形段出现屈服点，当岩石相对软弱时，屈服点位于横向剪切变形段弯矩最大的地方，如图5(a)所示，随着剪切荷载进一步增加，沿节理面反对称分布的屈服点 H_1 ， H_2 形成塑性铰。一旦反对称塑性铰形成后，锚杆所能承受的剪切荷载不再增加。由于塑性铰位于最大弯矩点，该点锚杆横截面上剪力为0，锚杆处于拉弯状态，塑性铰内力满足屈服准则^[30]：

$$\frac{M}{M_y} + \left(\frac{N}{N_y}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

式中： M 为塑性铰处锚杆截面弯矩； N 为锚杆轴向拉力； M_y ， N_y 分别为锚杆极限弯矩和轴向极限抗力。

塑性状态下弯矩表达式^[30]为

$$M_y = 1.7\sigma_y \left(\frac{D_b^3\pi}{32}\right) \quad (5)$$

锚杆拉剪破坏如图5(b)所示，反弯点 O 点锚杆横截面上弯矩为0，锚杆处于拉剪状态。由于坚硬岩石具有较强的约束力，使锚杆的横向抗剪效应更显著，锚杆横截面上承受较大的剪力作用，在轴力和剪力的联合作用下 O 点首先达到屈服状态并进一步发生拉剪破坏。拉剪破坏模式采用Tresca强度准则：

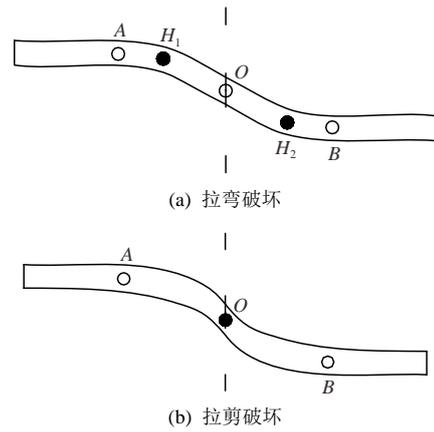


图5 节理锚杆失效模式

Fig.5 Failure modes of a jointed rock bolt

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{(A_b f_y)^2 - N^2} \quad (6)$$

式中： A_b ， f_y 分别为锚杆截面积和屈服强度。

无论是拉弯破坏还是拉剪破坏，在评价锚杆的抗力时，均需要求解反弯点 O 处锚杆横截面上的轴力 N 和剪力 Q ，并采用下式来计算锚杆对节理面的抗力贡献：

$$T = N \cos \alpha + Q \sin \alpha + (N \sin \alpha - Q \cos \alpha) \tan \phi \quad (7)$$

式中： α 为锚杆轴线方向与节理面所夹角， ϕ 为节理面内摩擦角。

在现有的锚杆设计理论和方法中，锚杆的抗力一般取决于锚杆自身的抗拉强度，锚固体的几何力学参数确定后即可获得。但拉剪联合作用下锚杆抗力的计算非常复杂，体现在2个方面：一是锚杆轴力和剪力的大小受诸多因素影响，如钢筋自身的形态和几何力学参数、岩石的力学性质以及结构面力学参数和位移等；二是锚杆轴力和横向剪力相互耦合，不能单独计算。因此，基于试验研究和理论分析等方法获得拉剪作用下节理岩体锚固抗力评价方法是当前该课题研究的核心课题。

3 拉剪作用下节理岩体锚固试验研究

如前所述，节理岩体锚固试验研究方面，除了少数采用相似材料开展模拟试验外，现有研究多采用大尺寸混凝土或岩石试件(节理面尺寸介于30 cm × 30 cm和30 cm × 80 cm范围)和高强度钢筋(直径8~40 mm)开展单节理或双节理直剪试验，主要探讨2方面的问题：

(1) 拉剪作用下锚固体及岩体几何力学参数对锚杆横向剪切效应的影响。包括岩体的强度、结构面的内摩擦角和剪胀角、锚杆直径与截面积、锚杆

与节理面的夹角、锚杆直径和钻孔直径的比值以及锚杆表面形态等;

(2) 锚杆锚固类型对节理岩体锚固效果的影响。如预应力锚杆和非预应力锚杆、黏结型锚杆和摩擦型锚杆以及全长黏结型锚杆和端锚锚杆等。

3.1 锚固参数对节理岩体锚固特性的影响

在锚固体几何力学参数研究中, 相较而言, 锚杆锚固角和节理面剪胀角是影响加锚节理力学特性的主要因素, 也是相关文献中研究最多的 2 个参数。

3.1.1 锚固角对横向抗剪效应的影响

在节理岩体锚固机制研究中, 锚杆与节理面的夹角被认为是影响锚杆销钉效应的主要因素, 因而也是节理岩体锚固试验研究中最受关注的问题。为方便起见, 本文定义锚固角为锚杆与节理面的夹角(工程实践中锚杆锚固角指锚杆与水平面的夹角)。

S. Bjurström^[18]首次系统地开展了加锚节理岩体的剪切试验, 试验中采用全长黏结型锚杆加固有贯通结构面的花岗岩体, 试验结果表明, 锚杆有效的提高了节理面的剪切刚度; 锚杆破坏时呈现明显地拉剪破坏特征。锚固角对锚杆“销钉效应”强弱有显著的影响, 当锚固角小于 35°时, 锚杆呈现拉伸破坏特征, 锚杆的横向抗剪效应可以忽略不计。

C. H. Liu 和 Y. Z. Li^[12]分析了不同节理面摩擦角情况下锚固角对锚杆横向剪切抗力的影响, 指出当锚固角小于节理面摩擦角时, 锚杆的横向剪切抗力接近于 0, 即此时可忽略锚杆的“销钉效应”而只考虑锚杆轴力对节理面强度的贡献。

P. Egger 和 H. Fernandez^[56]系统研究了锚固角对其抗剪强度贡献的影响, 发现锚杆抗剪强度贡献最大的锚固角介于 30°~60°之间, 当锚固角在 40°~50°范围时, 加锚节理面破坏时的剪切位移最小。

葛修润和刘建武^[11]开展了锚杆加固混凝土试块的剪切模型试验, 研究加锚节理的增韧止裂机制。指出相比于未施加锚杆的节理面, 加锚节理面的剪切强度在达到一定的剪切位移之后仍然增加, 且剪切刚度明显高于未加锚杆的节理面; 锚杆处于弹性阶段时, 锚固角对节理面的剪切刚度的大小影响显著, 锚固角越小, 节理面剪切刚度越小, 节理面剪切刚度在锚固角为 90°时达到最大。C. J. Haas^[19-20]开展了室内树脂灌浆锚杆加固石灰岩和片岩的剪切试验, 发现相对于垂直于节理面安装的锚杆, 与节理面倾斜安装的锚杆更能提高加锚节理面的剪切刚度和对节理面剪切强度贡献值; 此外还发现, 节理

面上施加的正应力的大小并不影响锚杆对节理面抗剪强度贡献值的大小。

S. Maiolino 和 F. L. Pellet^[34]利用大尺寸块体进行直剪试验, 研究了不同直径、不同初始锚固角对节理面抗剪荷载贡献值的影响。试验结果表明, 当初始锚固角为 45°和 60°时, 锚杆对节理面的抗剪荷载贡献值较初始锚固角为 90°时显著提高; 初始安装角度较小时, 加锚节理面剪切刚度较高。

A. M. Ferrero^[30]对不同强度的钢筋和钢管开展锚固节理剪切试验结果表明, 基岩的强度越大, 锚杆内剪切力越高, 而加锚节理的总抗力越低。J. J. Azuar 等^[21-22]开展了室内树脂灌浆锚杆加固混凝土试块的剪切试验, 探讨了锚固角为 90°, 60°和 30°时加锚节理面剪切位移和剪切荷载的变化规律(见图 6), 指出倾斜安装的锚杆对节理面抗剪强度的贡献更大, 节理面达到峰值抗剪强度前剪切位移更小; 垂直于节理面安装的锚杆对节理面抗剪强度的贡献值能达到锚杆极限抗拉强度的 60%~80%, 而倾斜安装的锚杆这一值能达到 90%左右。

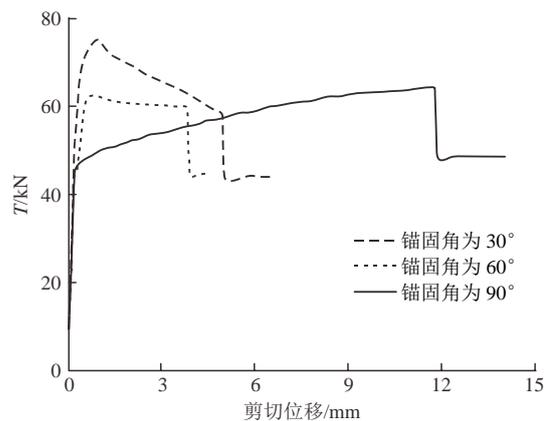


图 6 不同锚固角的剪切位移 - 剪切力曲线^[21-22]

Fig.6 Relationships between shear force and shear displacement with different inclined angles^[21-22]

其他试验研究大多揭示了类似的规律^[10, 24-25, 28-29], 从上述研究中可以得出以下认识:

(1) 锚固角对锚杆“销钉效应”的强弱影响显著, 锚固角越大, 锚杆“销钉效应”越强, 其横向抗剪作用越大。但是, 锚杆的“销钉效应”越强, 并非意味锚杆加固效果越强, 与之相反的是, 锚杆“销钉效应”越显著, 锚杆内剪切应力越大, 而锚杆轴力相对锚杆横向抗力所发挥的作用越小, 其结果导致锚杆的总抗力贡献越小。

(2) 当锚固角小于某一临界角度时, 锚杆“销钉效应”可忽略, 此时锚杆可按受拉杆件处理。目

前对临界锚固角的确定尚无统一认识,从现有的研究结果来看,临界锚固角在 30°~40° 范围内。

3.1.2 节理面剪胀效应

节理面剪胀效应不仅直接影响节理面自身的抗剪强度,同时由于剪胀角的存在改变了剪切过程中节理面的相对位移(趋势)而影响加锚节理的力学特性,因此,在节理岩体锚固机制研究中,节理面剪胀效应备受关注。

R. Yoshinaka 等^[26]开展了起伏角为 0°, 10° 和 20° 锯齿状凸体结构面的锚固剪切试验,结果表明,节理面的剪胀效应能有效地提高锚杆对节理面的抗剪强度贡献,节理面的剪胀角越大,剪切过程中锚杆杆体的抗拉性能发挥的作用越大。P. Egger 和 L. Zabuski^[27]进行了加锚节理的直剪试验,试验中节理面为采用规则锯齿状起伏角为 17° 的节理面,锚杆与节理面垂直安装,试验结果表明,节理面的剪胀作用使得锚杆对节理面抗剪强度的贡献值提高,节理面剪切位移减小。P. M. Dight^[24]基于全长黏结型锚杆加固石膏、玄武岩的剪切试验得到类似的结论。最近, N. Chen 等^[39]试验研究了节理面粗糙度对节理锚杆变形特征的影响,结果表明,随着节理面粗糙度的增大,锚杆横向剪切变形段的长度逐渐增大。此外, X. Wu 等^[40]发现相对于无锚节理面,锚杆能有效抑制节理面的剪胀效应。

锚杆内剪力和轴力的大小取决于锚杆的横向挠曲变形和轴向拉伸变形,而锚杆的挠曲变形和拉伸变形与节理面的法向和切向位移密切相关。如图 7^[12]所示,锚杆横向剪切变形段变形与节理面位移的关系如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= u \sin \alpha + v \cos \alpha \\ \Delta_2 &= v \sin \alpha - u \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: Δ_1 , Δ_2 分别为 O 点的轴向变形和挠度; u , v 分别为节理面法向和切向位移。

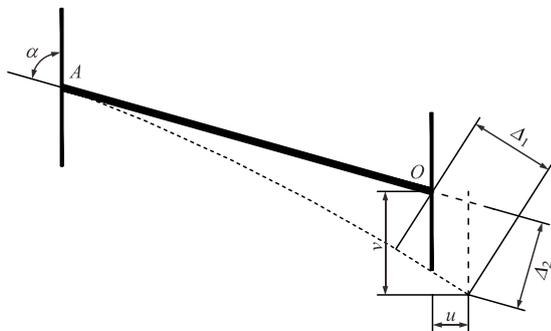


图 7 锚杆横向剪切变形段变形协调关系^[12]

Fig.7 Deformation compatibility conditions of the deflecting length of a bolt^[12]

节理面法向和切向位移因剪胀效应满足如下关系^[12]:

$$u = v \tan \beta \quad (9)$$

式中: β 为节理面剪胀角。

联立式(8)和(9)可得^[12]

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \tan(\alpha - \beta) \quad (10)$$

从以上研究可以看出,剪胀角越大,锚杆挠曲变形相对于其轴向变形越小,即锚杆的“销钉效应”越弱,锚杆的抗拉性能发挥的作用越大。

3.1.3 其他参数研究

在锚固体几何力学参数研究中,相较于锚固角和节理面剪胀角,其他参数的研究相对较少。K. Spang 和 P. Egger^[10]通过室内和现场的剪切试验,从锚杆直径、节理面的内摩擦角以及岩体坚硬程度等几个方面进行了探讨。结果表明,锚杆对节理面剪切抗力贡献与锚杆的截面积成线性正比例关系;节理面内摩擦角的大小对加锚节理面的力学性能有显著影响,粗糙的节理面与平直光滑的节理面相比,锚杆对两者的抗剪强度贡献值相差多达 50%,加锚节理面的剪切刚度随着节理面内摩擦角的增大而增加;锚杆对软弱岩体的抗力贡献大于相同条件下加固较坚硬岩体的抗力贡献。

A. M. Ferrero^[30]开展了锚固节理剪切试验,试验结果表明,节理面的剪切抗力及剪切位移分别正比于锚杆的截面积与直径;对延性和脆性锚杆来说,其破坏分别受钢筋的极限强度和极限应变所控制。R. Ribacchi 等^[57]通过试验研究得到了加锚节理面抗剪强度和剪切位移大小与锚杆的横截面积和锚杆直径之间类似的关系。

P. Schubert^[58]开展了全长黏结型锚杆加固混凝土试块和石灰岩的剪切试验,发现围岩的强度对锚杆的变形行为和有很大的影响,在提供相同的抗剪强度贡献的情况下,较硬岩体中锚固锚杆的剪切位移更小。

A. M. Ferrero^[30]利用直剪试验研究了锚杆直径与钻孔直径比值对锚杆抗剪性能的影响,发现当这一比值小于 0.5 时,较坚硬节理岩体中的锚杆抗剪强度会下降。

L. P. Srivastava 和 M. Singh^[59]利用大尺寸直剪伺服控制试验装置研究了锚杆数量对节理岩体锚固效果的影响,研究表明,节理面的抗剪强度随着锚杆数量的增加而增大;锚杆数量存在一个阈值,超

过这个阈值, 节理面的破坏由脆性断裂变为延性破坏, 在阈值附近, 节理面的刚度最大; 当锚杆数量少于阈值时, 节理面的剪胀角随着法向正应力增加而增大, 锚杆数量大于阈值时, 节理面的剪胀角则随着法向正应力增加而减小。而 H. W. Jing 等^[41]的试验结果表明, 加锚节理面的峰值剪切强度随着锚杆数量的增加呈非线性增长。

G. Snell 等^[42]利用双剪切试验研究了节理开度对锚杆抗力贡献及最大剪切位移的影响, 结果表明, 随着节理面开度的增加, 锚杆最大抗力贡献逐渐减小; 而锚杆破坏时对应的剪切位移随着节理开度的增加而逐渐增大, 两者呈近似线性递增关系。

上述研究表明, 锚杆、岩体以及结构面的几何力学参数对其拉剪力学特向都有明显的影响, 归纳如下:

(1) 锚杆对节理面的抗力贡献与其横截面积呈线性正比关系, 而与最大剪切抗力对应的剪切位移与锚杆直径成线性关系; 加锚节理的峰值抗剪强度与锚杆数量呈非线性关系。

(2) 岩体的强度对锚杆剪切力学特性有相助的影响, 岩体强度越大, 锚杆约束岩体剪切变形能力越强, 锚杆的“销钉效应”越强, 但其提供的抗力贡献越小, 此时采用拉杆模型来评价锚杆抗力时其误差越大。

(3) 加锚节理面的剪切刚度与其内摩擦角和粗糙度呈正相关关系, 但随节理面开度增加, 锚杆的抗力贡献减小, 而锚杆破坏时节理面剪切位移与节理面开度成线性增加关系。

3.2 锚杆类型对锚固特性的影响

锚杆基于不同的划分原则可分为不同的类型, 如根据是否施加预应力分为预应力(主动)锚杆和非预应力(被动)锚杆、按轴向荷载传递机制分为黏结型锚杆和摩擦型锚杆、按锚固长度分为全长黏结型锚杆和端锚锚杆等。锚杆类型不同, 锚固荷载传递机制及变形特性存在显著的差别。尽管全长黏结型锚杆是节理岩体锚固研究的主要研究对象, 但一些学者开展了不同锚杆类型的试验研究, 以期通过对比分析探讨锚杆类型对节理岩体锚固特性的影响。

对受拉锚杆来说, 预应力可以有效减少岩土体的变形, 但不改变锚杆的极限抗力。现有研究表明, 预应力对承受拉剪作用的节理锚杆的影响也遵循类似的规律。C. J. Haas^[19-20]开展了室内树脂灌浆锚杆加固石灰岩和片岩的剪切试验, 发现施加预应力与否并未对试验结果有显著影响。S. Hibino 和 M. Motojima^[23]开展了利用全长黏结型锚杆和端锚锚

杆加固混凝土试块的剪切试验, 试验结果表明, 在锚杆上施加预应力可以减少节理面剪切位移大小, 但对锚杆抗剪强度贡献值影响不大。A. M. Ferrero^[30]对垂直加锚的混凝土和花岗岩试件进行了剪切试验, 对比分析了有预应力和无预应力情况下锚杆抗力和位移的大小(见图 8), 从图 8 可以看出, 无论在屈服阶段还是在破坏阶段, 预应力对锚杆抗力没有影响, 但剪切荷载相同时, 预应力锚杆的剪切位移比非预应力锚杆显著减小。

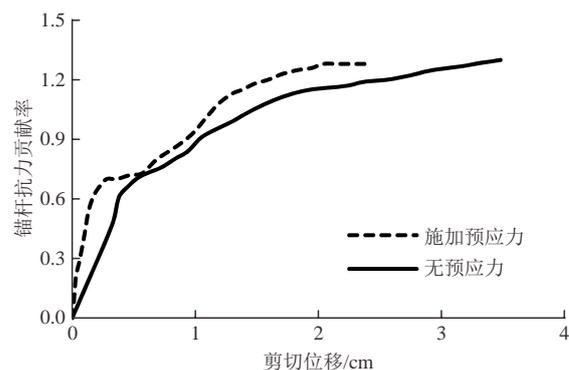


图 8 节理锚杆荷载 - 位移曲线^[30]

Fig.8 Relationships of shear load and shear displacement of a jointed bolt with or without prestressing^[30]

E. Mchugh 等^[60-61]研究发现锚杆轴向荷载对加锚节理面抗剪强度影响很小, 锚杆上的轴向荷载只能对节理面的屈服强度产生微弱影响, 而对节理面的极限强度并无任何影响; 在锚杆上施加预应力荷载可以显著的减小节理面的相对错动位移, 并不能有效提高加锚节理面的剪切强度。

S. Hibino 和 M. Motojima^[23]开展了利用全长黏结型锚杆和端锚锚杆加固混凝土试块的剪切试验, 试验结果表明, 剪切位移相同时, 全长黏结型锚杆的抗剪强度大大高于端锚锚杆的抗剪强度。

B. Ludvig^[25]在大型剪切试验钢架上对实心钢锚杆、中空膨胀式锚杆、实心玻璃纤维锚杆和玻璃纤维中空锚杆进行了剪切试验, 试验结果表明, 直径相同时, 实心钢锚杆的抗剪强度最大; 横截面积相同时, 实心锚杆破坏前的剪切位移比空心锚杆的剪切位移小、剪切强度大。曾开华等^[62]利用剪切试验研究了空心锚杆与实心锚杆的抗剪切性能, 试验结果表明, 对于同一种类型的空心锚杆, 锚杆内是否填充其他材料, 对抗剪性能有较大影响。空心锚杆内插钢筋能极大提高锚杆抗剪性能, 注浆次之, 空心锚杆最小。

G. Grasselli 等^[28-29]开展了双节理加锚剪切试验模型, 研究了相同直径的全长黏结型锚杆和膨胀式

锚杆(Swellex)与节理面垂直安装时对节理剪切强度的贡献,发现在较小剪切位移时,全长黏结型锚杆对节理面抗剪强度的贡献达到其自身极限抗拉强度的75%,而膨胀中空锚杆只有20%,当锚杆发生破坏时,全长黏结型锚杆对节理面抗剪强度的贡献能达到其自身极限抗拉强度的85%~95%,膨胀中空锚杆只有65%~75%,如图9^[29]所示。

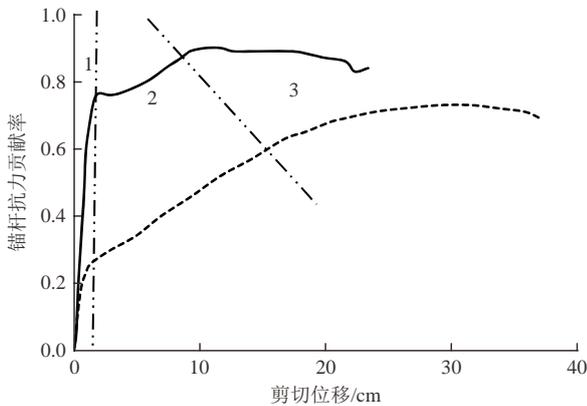


图9 全长黏结型锚杆和胀壳式锚杆的抗力贡献^[29]

Fig.9 Contributions of a fully grouted bolt or Swellex bolt^[29]

黄军等^[63]开展了玻璃钢纤维锚杆(GFRP)的纯拉伸与纯剪切试验,发现GFRP的极限抗剪强度仅为其极限抗拉强度的30%左右。

张伟和刘泉声^[64]通过室内直剪试验,系统研究了节理面无锚杆、端头锚固与全长黏结型锚固3种类型对锚杆抗剪性能的影响,研究表明,不同的锚固类型对剪切刚度的提高幅度大小顺序为:预应力全长黏结型锚杆、无预应力全长黏结型锚杆、预应力端锚锚杆和无预应力端锚锚杆。

Y. Chen等^[65-67]通过伺服控制装置与锚杆上安装的应变计系统开展加锚节理剪切试验,研究了传统全长黏结型锚杆和吸能锚杆(D-Bolt)在拉剪荷载作用下的力学行为,试验结果表明,两类锚杆在剪切荷载作用下的变形曲线均经历4个阶段:线弹性阶段、屈服阶段、塑性强化阶段和破坏阶段,但相比于全长黏结型锚杆,D-Bolt型锚杆的塑性变形范围更宽,具有更强的变形和抗破坏性能。

X. Li等^[35]通过剪切试验研究了钢筋锚杆、玻璃钢锚杆(GFRP)与锚索的剪切变形特征与破坏特点,结果表明,在剪切作用下,钢筋锚杆与锚索的剪切力与剪切位移曲线呈双线性特征;钢筋锚杆对节理面的抗力贡献最大,锚索次之,玻璃钢锚杆最小;钢筋锚杆与锚索在较大剪切位移时产生拉破坏而玻璃钢锚杆在位移较小时就产生剪切破坏。

上述研究表明,预应力可以显著约束不稳定岩

体的变形,但预应力没有改变锚杆自身的抗剪能力以及岩体对锚杆的横向约束作用,预应力对锚杆的抗力并无实质性的影响;相对于全长黏结型锚杆,岩体对端锚锚杆的横向约束作用弱,导致二者之间的荷载传导性弱,端锚锚杆的销钉效应被弱化,因此端锚锚杆的横向抗剪能力小于全长黏结型锚杆;而无论是空心锚杆、玻璃锚杆还是其他类型的锚杆,受其杆体自身的抗剪强度或截面积的影响,其锚固抗力与全长黏结型锚杆有显著差异。总而言之,锚杆自身的抗剪能力(锚杆抗剪强度和截面积)越大,岩体对锚杆的横向约束越强,则锚杆的销钉效应越显著。

4 拉剪作用下节理岩体锚固抗力评价方法

4.1 锚固节理面等效抗剪强度

锚杆对节理面剪切抗力贡献是节理岩体锚固研究中核心的问题之一,一些学者从节理面等效抗剪强度的角度出发,探讨了加锚节理抗剪强度表达式。P. G. Fuller和R. H. T. Cox^[68]认为锚杆剪切过程中在节理面附近会形成一对关于节理面对称的塑性铰,且2个塑性铰之间呈直线形态,考虑了锚杆剪切破坏前相对于锚杆初始状态的转角,提出了单根锚杆对节理面抗力贡献的计算模型:

$$\Delta\tau = \frac{A_b f_y}{A_j} [\cos(\alpha - \omega) + \sin(\alpha - \omega)\tan\phi] \quad (11)$$

式中: A_j 为单根锚杆所对应的节理面面积, ω 为锚杆破坏时的转角。

显然,式(11)虽然考虑了锚杆在剪切荷载作用下转角的影响,但仅考虑锚杆界面上轴力对节理面等效强度的贡献,本质上是对拉杆模型的一种修正。

葛修润等^[11, 52]认为加锚节理面的抗剪强度由4个部分组成:节理面本身的抗剪强度、由锚杆体“销钉”作用贡献的抗剪强度、由锚杆体轴向荷载沿节理面的法向分量和切向分量所贡献的抗剪强度,将单根锚杆的加固作用均化节理面上,得到加锚层面的抗剪强度为

$$\tau_{jb} = (\sigma_j + \sigma_{nb})\tan\phi + (c_j + c_b) \quad (12)$$

式中: σ_j 为节理面上法向应力; σ_{nb} 为锚杆对节理面的等效法向应力, $\sigma_{nb} = p\sigma_b \sin\alpha - p\tau_b \cos\alpha$; c_j 为节理面上的黏聚力; c_b 为锚杆对节理面的等效黏聚力, $c_b = p\sigma_b \cos\alpha + p\tau_b \sin\alpha$, p 为锚杆横截面面积与含单根锚杆节理面面积的比值, σ_b 和 τ_b 分别为锚杆与节理面交点处锚杆轴向应力和截面上平均剪

应力。

在上述研究的基础上, B. Liu 等^[69]利用大变形理论探讨了锚杆加固节理岩体时抗剪力与锚杆变形角间关系, 同时考虑锚杆截面剪应力和转角的影响, 给出了拉剪荷载作用下加锚节理岩体抗剪强度计算表达式:

$$\tau_{jb} = c_j + \sigma_j \tan \phi + p \sigma_b [\cos(\alpha - \omega) + \sin(\alpha - \omega) \tan \phi] + p \tau_b [\sin(\alpha - \omega) - \cos(\alpha - \omega) \tan \phi] \quad (13)$$

D. Ashitava^[70]研究了常法向刚度条件下非平直节理面加锚剪切强度, 认为加锚节理面的剪切强度由锚杆横向的抗剪强度、锚杆的轴向作用引起的节理面抗剪强度增加以及节理面本身的抗剪强度组成, 提出了常法向刚度条件下加锚节理面抗剪强度 τ_s 与剪切位移 s 关系式:

$$\tau_s = \frac{k_b s}{A / \sin \alpha} + \sigma_{js} \left(\frac{\tan \phi + \tan i}{1 - \tan \phi \tan i_s} \right) \quad (14)$$

式中: k_b 为锚杆的剪切刚度, σ_{js} 为剪切位移为 s 时节理面的法向应力, i 为节理面初始起伏角, i_s 为节理面剪切位移为 s 时的节理面起伏角。

上述公式从形式上定义了加锚节理面抗剪强度, 但并未给出相关参数如锚杆内轴向应力和剪切应力等的计算方法, 无法有效评估锚杆对岩石节理的抗剪强度的贡献。

4.2 节理岩体锚固抗力经验公式

一些学者基于室内剪切试验提出了节理岩体锚杆抗力计算的公式。H. Dulacska^[43]基于钢筋加固带有节理面的混凝土试块的剪切试验, 假定混凝土对锚杆横向剪切变形段的法向约束力均匀分布, 提出了锚杆加固节理面时锚杆抗力贡献表达式:

$$T = 0.2 D_b^2 A_b f_y \sin \alpha \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma_c}{0.03 f_y \sin^2 \alpha}} - 1 \right) \quad (15)$$

K. Spang 和 P. Egger^[10]基于大量的剪切试验提出了加锚节理岩体中锚杆抗力计算公式:

$$T = A_b f_y \left[1.55 + 0.011 \sigma_c^{1.07} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \beta \right) \right] \cdot \sigma_c^{-0.14} (0.85 + 0.45 \tan \phi) \quad (16)$$

并进一步指出, 式(16)仅在围岩体单轴抗压强度 10~70 MPa、锚固角为 60°~90° 范围内变化时是适用的。

X. Wu 等^[40]提出了节理面粗糙度系数与锚杆抗力贡献峰值之间的关系式, 认为两者之间呈近似指

数关系:

$$f_T = b - (b - a) e^{-cJRC} \quad (17)$$

式中: f_T 为无量纲化的锚杆对节理面的抗力贡献峰值; JRC 为节理面粗糙度系数; a 为 $JRC = 0$ 时无量纲化的锚杆对节理面抗力贡献峰值; b 和 c 均为常数, 分别为 1.09, 0.101。

S. Bjurström^[18]在研究节理岩体锚固“销钉效应”时, 不考虑剪切过程中锚杆的变形, 将锚杆轴力和横向剪切力看作为 2 个独立的变量, 其抗力分别采用下式计算:

$$T_N = A_b f_y (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi) \quad (18)$$

$$T_Q = 0.67 D_b^2 \sqrt{f_y \sigma_c} \quad (19)$$

进一步地, P. M. Dight^[71-72]认为在锚杆剪力为 0 及弯矩最大的点首先发生屈服, 假设锚杆发生屈服时符合 Tresca 屈服准则, 并考虑节理面剪胀效应, 提出了锚杆轴力和横向剪力对节理面抗力贡献的计算公式:

$$T_N = A_b f_y [\cos \alpha + \sin \alpha \tan(\phi + \beta)] \quad (20)$$

$$T_Q = \frac{D_b^2}{4} \sin \alpha \sqrt{1.7 \pi q_u f_y [1 - (N/N_y)^2]} \quad (21)$$

上述经验公式以“拉杆模型”为理论基础, 从力或变形的角度来评价锚杆的“销钉效应”, 存在如下问题: 一是完全不考虑锚杆与岩体的横向相互作用, 没有反映节理岩体锚固的内在机制; 二是节理锚杆内轴力和剪力相互耦合而不是独立的变量, 将二者单独计算并在拉杆模型的基础上简单叠加锚杆剪力的抗力贡献不仅在力学机制上是不合理的; 三是高估了节理锚杆的加固能力, 如众多试验研究揭示的规律, 由于锚杆“销钉效应”越强烈, 锚杆的总体抗力越小。图 10 描述了锚固角对节理锚杆抗力的影响^[12], 可以看出, 无论是否考虑“销钉效应”, 节理锚杆的抗力随锚固角的变化规律均遵循先增大后减小的趋势, 但考虑“销钉效应”的锚固抗力小于不考虑“销钉效应”时的锚固抗力, 且随着锚固角的增加, 锚杆“销钉效应”越强烈, 二者的偏离值越显著。

鉴于以上认知, M. Holmberg^[55]从静力平衡的角度探讨了锚杆内轴力和剪力对其抗力的贡献, 提出了在拉剪作用下考虑锚杆偏转角 ω 的锚杆内轴力和剪力对其抗力贡献的计算表达式:

$$T = N [\sin(\alpha - \omega) + \cos(\alpha - \omega) \tan \phi] + Q [\cos(\alpha - \omega) - \sin(\alpha - \omega) \tan \phi] \quad (22)$$

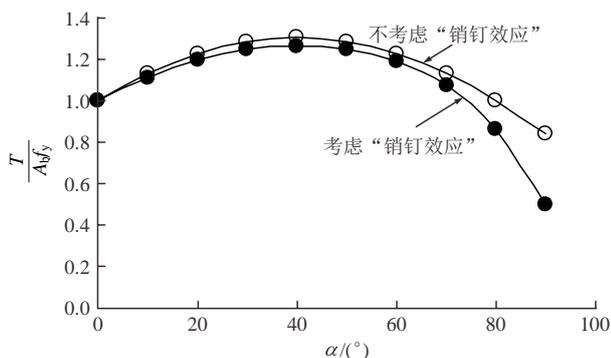


图 10 锚固角对节理锚杆抗力的影响^[12]

Fig.10 Influence of the bolting angle on the contribution of a jointed rock bolt^[12]

如同节 4.1 所述加锚节理面等效抗剪强度一样，式(22)也仅从形式上给出了锚杆对岩石节理的剪切抗力贡献，没有给出决定锚杆剪切抗力大小的锚杆内轴力和剪力定量表达式。

对基于拉杆模型的传统锚固设计方法，由于采用轴向荷载作为设计依据，工程安全系数确定后，即可计算维持岩土体介质稳定所需要的锚固抗力，进而确定锚杆直径、数量及锚固长度等参数。但对节理岩体锚固来说，锚杆与岩体的横向相互作用即“销钉效应”显著，基于结构面位移所导致的锚杆内相互耦合的轴力和剪力构成了一个不确定的力学体系，目前尚无成熟的理论模型来求解。因此，建立能反映结构控稳特点以及锚杆与岩体横向相互作用机制并能指导工程实践的节理锚固理论体系是当前需要突破的重点和难点。

4.3 节理岩体锚固抗力评价模型

4.3.1 弹性地基梁模型

节理岩体锚固的弹性地基梁模型最早是由 P. M. Dight 等^[24]引入到节理岩体的锚固中，用以解决锚杆在拉剪荷载作用时，锚杆与围岩体的相互作用问题。节理岩体锚杆在剪切荷载作用下，锚杆与岩体的相互作用满足弹性地基梁的相关力学边界条件或假设：

(1) 岩体对锚杆的横向约束作用沿锚杆横向挠曲变形段连续分布；

(2) 锚杆的横向挠曲变形与岩体的挤压变形满足变形连续条件；

(3) 锚杆横向剪切变形段处，较小的荷载作用下锚杆与砂浆即发生解耦，相对于锚杆的轴向荷载，锚杆与砂浆的之间沿锚杆轴向的摩擦力可忽略不计，可假设岩体对锚杆的约束力垂直于锚杆轴线；

(4) 假定锚杆变形符合平截面假设。

采用弹性地基梁模型分析节理岩体锚固力学特

性的核心思想是将锚杆内轴力和剪力视作相互独立的 2 个变量，用 Winkler 弹簧模拟锚杆与岩体的相互作用，求解锚杆的挠曲线方程，将锚杆内弯矩和剪力表述为锚杆挠曲变形的函数^[46-47, 73-74]，即

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (23)$$

$$Q = EI \frac{d^3 y}{dx^3} \quad (24)$$

式中： E 、 I 分别为锚杆的弹性模量和截面惯性矩； y 为锚杆挠度。

由弹性地基梁理论可建立锚杆横向剪切变形段的挠度微分方程：

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + \delta D_b y = 0 \quad (25)$$

其通解如下：

$$y = e^{\mu x} (B_1 \cos \mu x + B_2 \sin \mu x) + e^{-\mu x} (B_3 \cos \mu x + B_4 \sin \mu x) \quad (26)$$

式中： μ 为锚杆的特征系数， $\mu = \sqrt{\frac{\delta D_b}{4EI}}$ ； B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 均为待定积分常数。

式(26)中的四个待定积分常数 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 可依据锚杆的几何力学边界条件进行联合求解。

取节理面一侧的锚杆为研究对象，将其视为弹性地基上的半无限梁，如图 11 所示。在节理面处剪切荷载 Q_0 和弯矩 M_0 的作用下，可求得其挠曲线方程如下^[48]：

$$y = \frac{e^{-\mu x}}{2\mu^3 EI} [Q_0 \cos \mu x - \mu M_0 (\cos \mu x - \sin \mu x)] \quad (27)$$

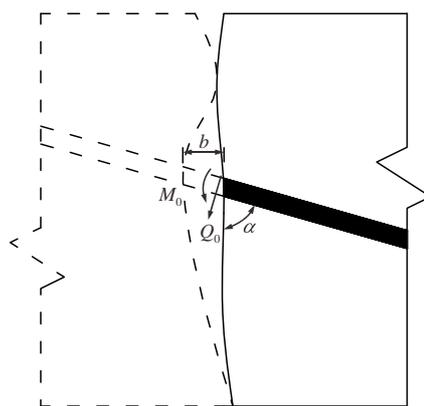


图 11 作用在锚杆上的剪力和弯矩

Fig.11 Shear force and bending moment acting on a bolt

当节理非紧密接触且开度为 b 时(见图 11)，反弯点在 $b/2$ 处，弯矩 M_0 取 $Q_0 b \sin \alpha / 2$ 。

现有研究多不考虑节理面开度的影响，即认为节理面紧密接触，半无限梁端点即为反弯点，此时

M_0 取 0，则式(27)可简化为

$$y = \frac{e^{-\mu x}}{2\mu^3 EI} Q_0 \cos(\mu x) \quad (28)$$

目前对特征系数尚无明确的计算或取值依据。

P. P. Oreste 和 M. Cravero^[75]建议采用现场试验确定特征系数，并按下式计算：

$$\mu = \sqrt[4]{\frac{T_{\text{test}}}{2EI\Delta_{\text{test}}}} \quad (29)$$

式中： T_{test} ， Δ_{test} 为锚头处施加的荷载及对应的挠度。

根据 Winkler 假设可由式(27)或(28)求解岩体施加于锚杆的法向分布力 q 以及锚杆内剪力和弯矩。

锚杆内轴力由下式确定：

$$dN = \pi D_b dx \quad (30)$$

F. Pellet 等^[73-74]在总结分析相关的试验研究后指出，在锚杆横向剪切变形段上存在 2 个特征点，一个是节理面与锚杆的交点，该点为横向剪切变形段的反弯点，其曲率和弯矩为 0，只受轴力和剪力作用；另一个为弯矩最大点，其剪力为 0。拉剪作用下，弯矩最大点处将先发生屈服，锚杆进入塑性状态并最终在交点处破坏(其合理性值得商榷)。假定塑性较 H_1 至锚杆与节理面交点 O 段(见图 5(a))的岩体法向约束力呈矩形分布，且该分布力与节理面处的剪切荷载构成平衡关系。基于锚杆内力极限平衡关系，提出了锚杆在点 A 屈服时节理面处锚杆内剪力和轴力的关系式：

$$Q_o = \frac{1}{2} \sqrt{p_u D_b \left(\frac{\pi D_b^2 f_y}{4} - N_o \right)} \quad (31)$$

采用弹性地基梁挠曲变形控制微分方程及最小势能原理，将锚杆内轴力和剪力表达为轴向变形和挠曲变形的函数，推导出 O 点处屈服时锚杆剪力计算三次方程：

$$Q_{oe}^3 + \frac{3p_u \pi^3 D_b \tan \alpha}{256b} Q_{oe}^2 - \frac{3p_u^2 \pi^4 D_b^4 \tan \alpha f_y}{4096b} = 0 \quad (32)$$

式中： b 为常量。

弹性地基梁模型在一定程度上反映了节理岩体锚杆的力学行为，但该模型存在以下几个方面的问题：

(1) 节理附近锚杆横向剪切变形段不仅在较小的轴力作用下即发生与浆体的解耦现象，同时浆体/岩体受锚杆的挤压出现破碎，剪切变形段锚杆对浆体/岩体的法向挤压荷载并不符合 Winkler 假设，将岩体当作弹性介质的假设存在很大的近似性；

(2) 拉剪作用下，锚杆内剪力和轴力相互耦合，弹性地基梁模型将其看作为 2 个独立变量是不合理的；

(3) 由于采用挠曲线方程来表述锚杆内剪力和

弯矩，计算分析过程非常繁琐。同时，无论是幂函数模型或双曲线函数模型^[76-77]，都不能很好地描述锚杆轴力传递机制；

(4) 相关参数如特征系数的取值存在一定的难度。

(5) 将锚杆当作半无限梁处理，在应用边界条件时，锚固段长度的取值对结算精度有何影响需进一步研究；

(6) 弹性地基梁模型无法描述锚杆进入屈服状态到极限破坏状态之间的锚固特性。

因此，弹性地基梁模型不仅难以在工程实践中进行应用，同时在理论发展上也存在天然的瓶颈。

4.3.2 结构力学模型

如前所述，节理岩体锚固理论研究的难点在于如何确定岩体对锚杆的横向约束作用，弹性地基梁模型并不能很好地解决这一问题。与弹性地基梁模型取锚杆全长或节理面一侧锚杆作为研究对象不同，在采用极限平衡方法建立锚杆内力关系时，研究对象为节理面附近锚杆横向剪切变形段，并将岩体对锚杆横向剪切变形段的横向约束作用进行简化处理，一般假设为三角形、梯形、矩形或组合型分布^[12, 50-51, 73]。

虽然 F. Pellet 等^[73-74]提出的节理岩体锚固模型是建立在弹性地基梁挠曲方程的基础上，计算过程复杂繁琐，但其基于锚杆的内力平衡关系给出的锚杆特定状态下(屈服和破坏)锚杆与节理面交点处的剪力和轴力静力平衡分析非常清晰，同时其通过简化岩体对锚杆的横向约束很好地解决了岩体与锚杆相互作用的复杂性问题，为建立合理的节理岩体锚固理论提供了参考。

C. H. Liu 等^[12, 50]根据节理岩体中锚杆横向剪切变形段在拉剪荷载作用下的地质力学特征，将全长黏结型锚杆的弯曲变形段视为两端固定的超静定梁，假定横向剪切变形段岩体对锚杆横向约束呈三角形分布。由于横向剪切变形段的解耦作用，该段砂浆/锚杆界面切向剪应力相对锚杆轴力忽略不计。解除端点约束后建立如图 12^[12]所示的静定力学模型，由结构力学理论可建立其力法方程：

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11} X_1 + \delta_{12} X_2 + \delta_{13} X_3 + \Delta_q &= \Delta_1 \\ \delta_{21} X_1 + \delta_{22} X_2 + \delta_{23} X_3 + \Delta_q &= \Delta_2 \\ \delta_{31} X_1 + \delta_{32} X_2 + \delta_{33} X_3 + \Delta_q &= \Delta_3 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

式中： X_1 ， X_2 和 X_3 分别为端点 B 处的轴力、剪力和弯矩； Δ_1 ， Δ_2 和 Δ_3 分别为端点 B 处的轴向变形、

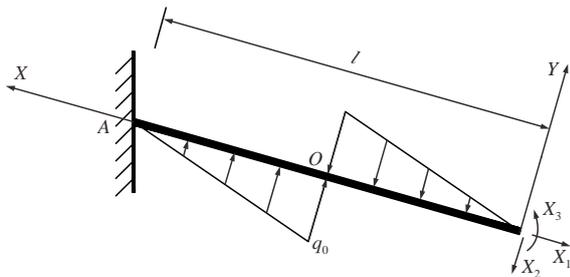


图 12 横向剪切变形段受力图^[12]

Fig.12 Forces acting at the deflecting section of a bolt^[12]

挠度和转角； δ_{ij} ， Δ_{iq} 分别为 $X_j = 1$ 和 q 所引起的沿 X_i 方向的位移($i, j = 1, 2, 3$)。

进一步由位移协调关系式(10)可得^[12]

$$\frac{Q_0}{N_0} = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\frac{kE}{3G} + \frac{3l^2 A_b}{80I}} \quad (34)$$

式中： k 为剪应力沿截面分布不均匀系数，其值与截面形状有关，圆截面锚杆取 10/9。

根据 Tresca 屈服准则， O 点屈服时锚杆上剪力与轴力满足如下关系：

$$Q_0 = \frac{1}{2} \sqrt{(A_b f_y)^2 - N_0^2} \quad (35)$$

由式(34)，(35)和结构面静力平衡条件可求得锚杆抗力计算表达式^[12]为

$$T = A_b f_y [(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi) + K \tan(\alpha - \beta)(\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi)] / \sqrt{4K^2 \tan^2(\alpha - \beta) + 1} \quad (36)$$

其中，

$$K = \frac{1}{\frac{kE}{3G} + \frac{3A_b l^2}{80I}}$$

式(36)中锚杆抗力表达为其轴向屈服荷载的 $A_b f_y$ 函数，从形式上来看类似于“拉杆模型”，计算参数如锚杆结合力学参数、结构面力学参数以及锚杆与结构面的夹角均易于确定，计算过程简单清晰。

图 13 展示了不同锚固角条件下节理岩体锚杆的抗力贡献试验数据与结构力学模型计算结果的对比情况^[12]，可以看出，理论模型和试验结果具有较好的一致性。

从结构控稳的角度看，结构力学模型更真实地反映了节理岩体锚固系统的地质特点，为节理岩体锚固理论研究和工程设计方法的建立提供了一条新的思路。

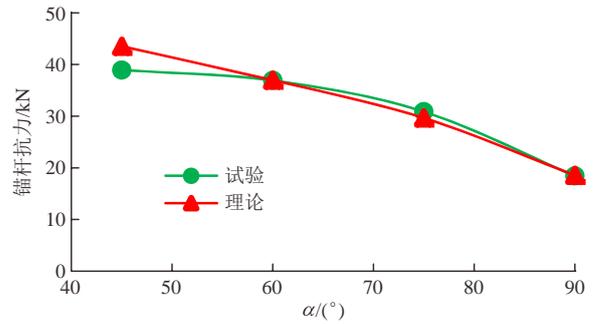


图 13 节理岩体锚固抗力理论与试验对比曲线^[12]

Fig.13 Comparison of theoretical and experimental results of bolting contribution of jointed rock^[12]

5 讨论与展望

对拉剪荷载作用下的节理岩体锚固来说，由于节理面发生相对位移或具有潜在的相对位移，除了传统“拉杆模型”中沿锚杆轴向的握裹作用外，岩体与锚杆之间还存在相互挤压作用，当锚杆锚固角越大，这种挤压作用越强烈，即锚杆“销钉效应”越显著，这种因结构面的相对位移造成锚杆呈现拉弯或拉剪破坏与“拉杆模型”纯受拉破坏具有完全不同的力学机制，锚杆与节理岩体的相互作用具有强烈的“结构控制稳定”的特征。节理岩体锚固机制与理论研究在岩质边坡如中倾或陡倾顺层边坡和地下洞室中有强烈的工程背景，因此，开展节理岩体锚固机制研究既是完善锚固理论的需要，也是工程实践的重大需求。尽管学术界在节理岩体锚固方面开展了大量的研究，但应该看到，相关研究还处于起步阶段，对节理岩体锚固内在机制阐述的还不够充分，还没有形成一套完善的锚固理论体系。今后的研究需重点解决以下几个方面的问题：

(1) 锚固理论应建立在锚杆与岩体相互作用的基础之上以揭示其内在机制。综合现有的研究来看，将拉剪作用下节理面附近 3~4 倍锚杆直径长度的挠曲变形段作为研究对象已得到广泛认可，因此，建立能准确反映节理岩体锚固力学与变形特征的锚杆挠曲变形段力学模型是首先需要解决的问题。

(2) 锚杆对节理的抗力贡献与岩石/砂浆对锚杆的约束作用密切相关，迄今为止，所有关于岩石/浆体对锚杆的约束力的大小和分布形式的认知都是基于相关的假设，体现在 2 个方面：一是由于锚杆横向挠曲变形段的长度比锚固长度小一个数量级，且在较小的轴向荷载下挠曲变形段浆体与锚杆界面发生解耦，因此，在相关的理论研究中基本上不考虑浆体沿锚杆挠曲变形段轴线方向的黏聚力或摩擦力；二是剪切作用下岩石/浆体对锚杆的横向约束

力, 由于岩石/浆体的抗压强度比锚杆小很多, 当锚杆还处于弹性状态时, 浆体由于挤压作用而破碎, 此时用弹性地基系数来描述其对锚杆的横向约束作用显然是不合适的。而将岩石/浆体的这种横向约束作用假设为沿挠曲变形段呈三角形、矩形或梯形等不同的分布形式, 虽然简化了相关力学分析, 但准确性和合理性还有待进一步论证, 同时, 应力分布集度如何确定也是需要解决的问题。

(3) 锚杆破坏模式的界定。节理岩体锚杆在拉剪作用下, 挠曲变形段有 2 种变形特征: 一是锚杆与节理面交点处为反弯点, 锚杆截面上受轴向拉应力和切向剪应力作用, 弯矩为 0, 呈拉剪变形特征; 二是除反弯点外呈拉弯变形特征。部分学者基于岩体的强度来判别, 即硬岩结构面发生拉剪破坏, 软岩结构面发生拉弯破坏, A. M. Ferrero^[30]建议岩石的单轴抗压强度为 50 MPa 作为其判别标准; 而 F. Pellet 等^[73-74]则认为拉剪作用下, 挠曲变形段弯矩最大点处将先发生屈服, 锚杆进入塑性状态并最终在交点处破坏。无论是 A. M. Ferrero^[30]建议的 50 MPa 的判别阈值还是 F. Pellet 等^[73-74]提出的塑性较先屈服交点再破坏的失效模式, 目前都没有有效的试验数据或证据支撑。由于不同的破坏模式对锚杆屈服或破坏时的抗力有显著影响, 明确节理岩体锚杆的破坏模式及其几何力学边界条件也是今后研究的重点。

(4) 锚杆挠曲变形段长度的量化分析。锚杆挠曲变形段长度在节理岩体锚固力学分析中是一个至关重要的参数, 关于锚杆挠曲变形段的长度, 现有研究并没有给出一个量化的评价方法, 而是基于相关试验统计得到约为锚杆直径的 2~4 倍, 显然, 在此范围内取值会得到较大的相对误差, 因此只能作为研究参考。如何结合试验数据和力学分析建立挠曲变形段长度的量化表达式是节理岩体锚固理论研究的重要一环。

(5) 锚固抗力计算模型是节理岩体锚固理论研究的最核心的问题, 当前主要有弹性地基梁模型和结构力学模型。笔者认为, 由于锚杆横向剪切变形段具有在较小的荷载作用下即会发生浆体的解耦和挤压破坏的特点, 弹性地基梁模型不具有合理的地质基础, 而结构力学模型反映了岩体与锚杆的相互作用及变形协调关系, 符合结构控制稳定的研究思想, 因而代表了今后的发展方向。结构力学模型需要在解决上述 4 个方面的问题的基础上, 进一步优

化弹性阶段即锚杆屈服前的计算模型, 作为锚固设计的理论依据, 同时, 建立大变形即塑性条件下锚固抗力计算模型既是理论研究的需要, 也是评估锚固工程安全储备的依据。

综合以上研究可知, 节理岩体锚固与传统的“拉杆模型”锚固机制显著不同, 由于试验研究的不充分及相关假设的差异性, 对节理岩体锚固力学特性、失效模式及评价方法上也存在明显不同的认知。以结构力学模型作为理论研究的发展方向, 开展大量的试验研究, 将理论方法与经验数据进行有机结合作为今后研究工作的一条基本思路。

6 结 论

本文对考虑横向抗剪效应的节理岩体锚固机制与理论研究现状进行了全面的梳理和总结, 系统分析了节理岩体锚固的地质力学特征、内在力学机制以及锚固模型研究成果、存在的问题和今后的研究重点, 结论如下:

(1) 节理岩体锚固在层状边坡及洞室支护中有广泛的工程应用背景, 由于结构效应的存在, 节理岩体中锚杆的锚固机制和传统的“拉杆模型”有着本质的区别。

(2) 拉剪荷载作用下锚杆的“销钉效应”越显著, 锚杆内剪切力越大, 而锚杆轴力发挥的作用越小, 导致锚杆的总抗力贡献越小。“销钉效应”强弱不仅取决于锚固角的大小, 同时与锚杆的类型、强度和直径以及岩石/浆体的强度有密切相关。

(3) 尽管对拉剪作用下节理岩体锚杆挠曲变形段的地质概化模型有了统一的认识, 但对节理岩体锚固锚杆挠曲变形段的几何力学边界条件特别是岩石/浆体对锚杆挠曲变形的约束作用研究尚不深入, 作为理论研究基础的节理岩体锚固力学模型仍是今后研究的重点。

(4) 节理岩体锚杆有 2 种可能的失效模式, 即拉弯破坏和拉剪破坏, 迄今为止, 对 2 种破坏模式的发生条件缺乏明确的界定方法。

(5) 结构力学模型为节理岩体锚固研究指明了方向, 但其弹性阶段的计算模型尚待进一步优化、大变形条件下的力学演化规律有待推进, 同时, 还需要大量的试验数据确定理论模型中相关参数的经验值, 以形成完善的节理岩体锚固理论体系和设计

方法。

参考文献(References):

- [1] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机制和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1 - 7.(ZHU Weishen, LI Shucai, CHEN Weizhong. Failure mechanism and anchoring effect of jointed rock mass and its engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2002: 1 - 7.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50330—2013 Technical code of building slope engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.(in Chinese))
- [3] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50086—2015 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. 50086—2015 Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.(in Chinese))
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T 5176—2003 水电工程预应力锚固设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T 5176—2003 Design specification of prestressed anchorage for hydropower project[S]. Beijing: China Planning Press, 2003.(in Chinese))
- [5] 夏才初, 孙宗顺. 工程岩体节理力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002: 1 - 5.(XIA Caichu, SUN Zongqi. Mechanics engineering rock joints[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002: 1 - 5.(in Chinese))
- [6] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 22 - 30.(LIU Yourong, TANG Huiming. Rock mass mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 22 - 30.(in Chinese))
- [7] 孙广忠. 岩体结构力学[J]. 地球科学进展, 1992, 7(1): 87 - 89.(SUN Guangzhong. Rockmass structural mechanics[J]. Advances in Earth Science, 1992, 7(1): 87 - 89.(in Chinese))
- [8] CHARLIE CHUNLIN LI. Field observation of rock bolts in high stress rock masses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(4): 491 - 496.
- [9] 杨松林, 徐卫亚, 黄启平. 节理剪切过程中锚杆的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 268 - 3 273.(YANG Songlin, XU Weiya, HUANG Qiping. Analysis on the bolt deformation as result of joint shear displacement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3 268 - 3 273.(in Chinese))
- [10] SPANG K, EGGER P. Action of fully-grouted bolts in jointed rock and factors of influence[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1990, 23(3): 201 - 229.
- [11] 葛修润, 刘建武. 加锚节理面抗剪性能研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(1): 8 - 19.(GE Xiurun, LIU Jianwu. Study of the shear resistance behaviour of bolted rock joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(1): 8 - 19.(in Chinese))
- [12] LIU C H, LI Y Z. Analytical study of the mechanical behavior of fully grouted bolts in bedding rock slopes[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(9): 2 413 - 2 423.
- [13] 程良奎, 张培文, 王帆. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668 - 682.(CHENG Liangkui, ZHANG Peiwen, WANG Fan. Several mechanical concepts for anchored structures in rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 668 - 682.(in Chinese))
- [14] LI C, STILLBORG B. Analytical models for rock bolts[J]. International Journal of Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(8): 1 013 - 1 029.
- [15] 张乐文, 汪稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 627 - 631.(ZHANG Lewen, WANG Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 627 - 631.(in Chinese))
- [16] 赵同彬, 谭云亮. 岩体锚固理论与技术研究的进展[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 1 - 6.(ZHAO Tongbin, TAN Yunliang. Progress of research on theories and technologies of rock mass anchorage[J]. Journal of Shangdong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4): 1 - 6.(in Chinese))
- [17] CHARLIE C. LI, GISLE STJERN, ARNE MYRVANG. A review on the performance of conventional and energy-absorbing rockbolts[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(4): 315 - 327.
- [18] BJURSTROM S. Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts[C]// Proceedings of the 3rd international congress on rock mechanics. Washington, DC: National Academy of Sciences, 1974, 2(Part B): 1 194 - 1 199.
- [19] HAAS C J. Shear resistance of rock bolts[C]// Transactions AIME. [S. l.]: [s. n.], 1976, 260: 32 - 41.
- [20] HAAS C J. Analysis of rock bolting to prevent shear movement in fractured ground[J]. Mining Engineering, 1981, 33(6): 698 - 704.
- [21] AZUAR J J. Stabilization of fissured rock masses by grouted steel bars[J]. Rapport de Recherche LPC, 1977, (73): 56 - 83.
- [22] AZUAR M M, DEBREVILLE H, LONDE P, et al. Rock mass reinforcement by passive rebars[C]// Proceedings of the 4th Congress ISRM. [S. l.]: [s. n.], 1979: 23 - 29.
- [23] HIBINO S, MOTOJIMA M. Effects of rock bolting in jointy rocks[C]// ISRM International Symposium. International Society for Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1981: 1 057 - 1 062.
- [24] DIGHT P M. Improvements to the stability of rock walls in open mines[Ph. D. Thesis][D]. Australia: Monash University, 1982.
- [25] LUDVIG B. Shear tests on rock bolts[C]// Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting. [S. l.]: [s. n.], 1983: 113 - 123.
- [26] YOSHINAKA R, SAKAGUCHI S, SHIMIZU T, et al. Experimental

- study on the rock bolt reinforcement in discontinuous rocks[C]// Proceedings of 6th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1987: 1 329 - 1 332.
- [27] EGGER P, ZABUSKI L. Behaviour of rough bolted joints in direct shear tests[C]// Proceedings of the 7th ISRM Congress. [S. l.]: [s. n.], 1991: 1 285 - 1 288.
- [28] GRASSELLI G, KHARCHAFI M, EGGER P. Experimental and numerical comparison between fully grouted and frictional bolts[C]// Proceedings of the 9th ISRM Congress. [S. l.]: [s. n.], 1999: 903 - 907.
- [29] GRASSELLI G. 3D Behaviour of bolted rock joints: experimental and numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, 42(1): 13 - 24.
- [30] FERRERO A M. The shear strength of reinforced rock joints[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1995, 32(6): 595 - 605.
- [31] JALALIFAR H, AZIZ N, HADI M. The effect of surface profile, rock strength and pretension load on bending behaviour of fully grouted bolts[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, 24(5): 1 203 - 1 227.
- [32] JALALIFAR H, AZIZ N. Analytical behaviour of bolt-joint intersection under lateral loading conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(1): 89 - 94.
- [33] JALALIFAR H, AZIZ N. Experimental and 3D numerical simulation of reinforced shear joints[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(1): 95 - 103.
- [34] MAIOLINO S, PELLET F L. Full scale lab testing for the determination of rockbolt contribution to reinforced joint shear strength[C]// ISRM Congress 2015 Proceedings-Int'l Symposium on Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 2015: 1 - 9.
- [35] LI X, AZIZ N, MIRZAGHORBANALI A, et al. Behavior of fiber glass bolts, rock bolts and cable bolts in shear[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(7): 2 723 - 2 735.
- [36] 叶金汉. 裂隙岩体的锚固特性及其机制[J]. 水利学报, 1995, (9): 68 - 74.(YE Jinhan. Mechanism and anchor characteristics of jointed rock masses[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, (9): 68 - 74.(in Chinese))
- [37] 朱维申, 李术才, 陈卫忠. 节理岩体破坏机制和锚固效应及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 116 - 121.(ZHU Weishen, LI Shucai, CHEN Weizhong. Failure mechanism and anchoring effect of jointed rock mass and its engineering application[M]. Beijing: Science Press, 2002: 116 - 121.(in Chinese))
- [38] 赵宇飞. 加锚结构面剪切特性及锚固岩体综合力学模型研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.(ZHAO Yufei. Research on the shear properties of bolted rock joints and the mechanical model of anchoring rock mass[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013.(in Chinese))
- [39] CHEN N, ZHANG X, JIANG Q, et al. Shear behavior of rough rock joints reinforced by bolts[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18: 1 - 9.
- [40] WU X, JIANG Y, LI B. Influence of joint roughness on the shear behaviour of fully encapsulated rock bolt[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51(3): 953 - 959.
- [41] JING H W, YANG S Q, ZHANG M L, et al. An experimental study on anchorage strength and deformation behavior of large-scale jointed rock mass[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43(7): 184 - 197.
- [42] SNELL G, KULEY E, MILNE D. A laboratory-based approach to assess rockbolt behaviour in shear[C]// Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology. [S. l.]: [s. n.], 2017: 45 - 54.
- [43] DULACSKA H. Dowel action of reinforcement crossing cracks in concrete[J]. ACI Journal Proceedings, 1972, 69(12): 754 - 757.
- [44] GAZIEV E G, LAPIN L V. Passive anchor reaction to shearing stress in a rock joint[C]// Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting. [S. l.]: [s. n.], 1983: 101 - 108.
- [45] HE X G, KWAN A K H. Modeling dowel action of reinforcement bars for finite element analysis of concrete structures[J]. Computers and Structures, 2001, 79(6): 595 - 604.
- [46] STIMPSON B. An analytical method for determining shear stiffness of an inclined grouted bolt installed across an open discontinuity[J]. International Journal of Mining and Geological Engineering, 1987, 5(3): 299 - 305.
- [47] PRUIJSSERS A F. Aggregate interlock and dowel action under monotonic and cyclic loading[Ph. D. Thesis][D]. Delft: Delft University of Technology, 1988.
- [48] 刘波, 李先炜, 陶龙光. 锚拉支架中锚杆横向效应分析[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 36 - 39.(LIU Bo, LI Xianwei, TAO Longguang. Analysis on lateral behavior of bolts in roof truss system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 36 - 39.(in Chinese))
- [49] EL-ARISS B. Shear mechanism in cracked concrete[J]. Internal Journal of Applied Math and Mechanism, 2006, 2(3): 24 - 31.
- [50] 王发玲, 刘才华, 龚哲. 顺层岩质边坡锚杆支护机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1 465 - 1 470.(WANG Faling, LIU Caihua, GONG Zhe. Mechanisms of bolt support for bedding rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1 465 - 1 470.(in Chinese))
- [51] LI X W, NEMCIK J, MIRZAGHORBANALI A, et al. Analytical model of shear behavior of fully grouted cable bolt subjected to shearing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 80: 31 - 39.
- [52] 杨延毅. 加锚层状岩体的变形破坏过程与加固效果分析模型[J].

- 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 309 - 317.(YANG Yanyi. Analytical model for evaluating reinforcement efficiency of bolts in layered rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(4): 309 - 317.(in Chinese))
- [53] 李术才, 王刚, 王书刚, 等. 加锚断续节理岩体断裂损伤模型在铜室开挖与支护中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 582 - 1 590.(LI Shucai, WANG Gang, WANG Shugang, et al. Application of fracture-damage model to anchorage of discontinuous jointed rockmass of excavation and supporting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 582 - 1 590.(in Chinese))
- [54] 杨双锁, 康立勋. 锚杆作用机制及不同锚固方式的力学特征[J]. 太原理工大学学报, 2003, 34(5): 540 - 543.(YANG Shuangshuo, KANG Lixun. Study on the principle of bolt action and the feature of variable anchorage[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003, 34(5): 540 - 543.(in Chinese))
- [55] HOLMBERG M. The mechanical behavior of untensioned grouted rock bolts[Ph. D. Thesis][D]. Sweden: Royal Institute of Technology Stockholm, 1991.
- [56] EGGER P, FERNANDEZ H. A Novel triaxial press-study of anchored jointed models[C]// Proceedings of the 5th International Congress on Rock Mechanics. [S. l.]: [s. n.], 1983: 171 - 175.
- [57] RIBACCHI R, GRAZIANI A, LEMBO-FAZIO A. Analysis of the behaviour of passive rock reinforcement systems[J]. Conv. Naz. di Geotecnica, Pavia, 1995, (2): 239 - 268.
- [58] SCHUBERT P. Das Tragvermögen des mörtelversetzten Ankers unter aufgezungener Kluffverschiebung[Ph. D. Thesis][D]. Leoben, Austria: Montanuniversität, 1984.
- [59] SRIVASTAVA L P, SINGH M. Effect of fully grouted passive bolts on joint shear strength parameters in a blocky mass[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(3): 1 197 - 1 206.
- [60] MCHUGH E, SIGNER S. Roof bolt response to shear stress: laboratory analysis[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, WV: West Virginia University, 1999: 232 - 238.
- [61] SIGNER S P. Load behavior of grouted bolts in sedimentary rock[C]// New Technology for Coal Mine Roof Support. [S. l.]: NIOSH Publication, 2000: 73 - 80.
- [62] 曾开华, 王春光, 王桂莲, 等. 底角锚杆抗剪特性研究[J]. 金属矿山, 2009, 39(2): 63 - 66.(ZENG Kaihua, WANG Chunguang, WANG Guilian, et al. Study on the shear resistance characteristics of floor anchor[J]. Metal Mine, 2009, 39(2): 63 - 66.(in Chinese))
- [63] 黄军, 叶义成, 王文杰, 等. 基于应用的GFRP锚杆拉伸和剪切性能试验研究[J]. 中国矿业, 2010, 19(10): 94 - 96.(HUANG Jun, YE Yicheng, WANG Wenjie, et al. Study on tensile test and shear test of GFRP bolt on the bases of its application[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(10): 94 - 96.(in Chinese))
- [64] 张伟, 刘泉声. 基于剪切试验的预应力锚杆变形性能分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8): 2 231 - 2 240.(ZHANG Wei, LIU Quansheng. Analysis of deformation characteristics of prestressed anchor bolt based on the shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8): 2 231 - 2 240.(in Chinese)).
- [65] CHEN Y. Experimental study and stress analysis of rock bolt anchorage performance[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(5): 428 - 437.
- [66] CHEN Y, LI C C. Performance of fully encapsulated rebar bolts and D-Bolts under combined pull-and-shear loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 45: 99 - 106.
- [67] CHEN Y, LI C C. Influences of loading condition and rock strength to the performance of rock bolts[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, 38(2): 208 - 218.
- [68] FULLER P G, COX R H T. Rock reinforcement design based on control of joint displacement-a new concept[C]// Proceeding 3rd Australian Tunneling Conference. [S. l.]: [s. n.], 1978: 28 - 35.
- [69] LIU B, TAO L G, ZHOU H W, et al. Calculation of complete curve of shear resistance for bolted rock joints based on large deformation analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 140 - 144.
- [70] ASHITAVA D. Shear behavior of fully grouted bolts under constant normal stiffness condition[Ph. D. Thesis][D]. Wollongong: University of Wollongong, 2001.
- [71] DIGHT P M. A case study of the behaviour of rock slope reinforced with fully grouted rock bolts[C]// International Symposium on Rock Bolting. [S. l.]: [s. n.], 1983: 523 - 538.
- [72] DIGHT P M. The theoretical behaviour of full contact bolts subject to shear and tension[C]// Proc. Int. Symp. Role of Rock Mech. in Excavation for Mining and Civil Works. [S. l.]: [s. n.], 1985: 215 - 222.
- [73] PELLET F. Strength and deformability of jointed rock masses reinforced by rock bolts[Ph. D. Thesis][D]. Lausanne: Swiss federal Institute of Technology in Lausanne, 1994.
- [74] PELLET F, EGGER P. Analytical model for the mechanical behavior of bolted rock joints subjected to shearing[J]. Rock mechanics and rock engineering, 1996, 29(2): 73 - 97.
- [75] ORESTE P P, CRAVERO M. An analysis of the action of dowels on the stabilization of rock blocks on underground excavation walls[J]. Rock Mechanics and rock Engineering, 2008, 41(6): 835 - 868.
- [76] PHILLIPS S H E. Factors affecting the design of anchorages in rock[R]. London: Cementation Research Ltd., 1970.
- [77] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机制分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 188 - 192.(ZHANG Jiru, TANG Baofu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 188 - 192.(in Chinese))